

ビショップ分割法を用いた三次元支持力解析 (II)

Three Dimensional Bearing Capacity Analysis by use of Bishop's Method of Slices (II)

成田 国朝・山口 柏樹*

Kunitomo Narita and Hakuju Yamaguchi

Following Part(I), numerical examinations are made in the present paper on the proposed 3D analysis of bearing capacity of square and rectangular footings. Discussions are first given on the fundamental characteristics of 3D solutions, by taking notice of the relation between the number of soil columns and the accuracy of solution, the influence of stress distribution along the base on the bearing capacity, and development and enlargement of curved sliding surfaces. Bearing capacity factors are then calculated to investigate the effects of the side ratio and the angle of internal friction, and the applicability of the theorem of correspondence and superposition error involved in the calculation of bearing capacity. Characteristics of the shape factors obtained by the present 3D solutions are also examined through comparisons with experimental and empirical formulae. Additional discussions are made on the 3D bearing capacity of footings on normally consolidated clay foundation with undrained strength increasing linearly with depth.

1. はじめに

本編は三次元支持力解析 (II) として、数値計算結果と考察を述べ、最後に結論で締めくくりを行う。数値計算においては、まず分割数と計算精度の関係、支持力値に与える分布形状の影響、そして曲面すべり面の大きさや発達状況など、三次元解析に伴う基礎的事項を明らかにした。次に支持力係数に着目して基礎幅比や摩擦角の影響を調べるとともに、支持力計算における対応定理や重ね合わせ性の適否を論じた。そして、本法の解を二次元解と対比して形状係数の特性を調べ、支持力成分ごとに従来提案されている実験・経験式との比較を行った。最後に、非排水強さが深さとともに直線的に増加する正規圧密粘土地盤の三次元支持力について、既往の研究成果

を踏まえて二、三考察を加えた。

なお前編で述べたように、論文構成の統一を図る意味で、図表および式の番号は (I)、(II) 編を通じて連番としている。また、参考文献は (I) 編に一括掲載されている。

2. 分割法支持力解析

ビショップ分割法を用いた三次元支持力解析法については (I) 編に詳述した。

3. 数値解析結果と考察

3. 1 三次元支持力解の特性

(1) 土柱分割数の影響

一般に、分割法に基づく安定解析では、領域分割数の多少が解の精度に影響することが多い。本研究の場合は、特に末端部においてすべり面の傾斜が急

になる部分があるので、要素分割の程度が支持力解にかなり効いてくることが考えられる。図-7は粘着力に関する支持力係数 N_c について分割数の影響を調べたものであり、横軸は基礎幅 B に対応する分割数 NB （すなわち $\Delta y = B/NB$ ）、縦軸は $NB=64$ の値（ $N_{c,64}$ ）を基準とした各 N_c 値の比率である。図から知れるように、 $NB > 32$ の範囲では解の変動が1%以内であり、ほぼ収束したと見なしてよいと思われる。他の支持力係数（ N_q, N_γ ）についても同様の検討を行ったが、いずれも N_c 値より収束性がよく、特に N_γ は ϕ' の値にかかわらず $NB=32 \sim 48$ で一定値に達することが知れた。このことから、以下の計算では N_c, N_q については $NB=64$ 、 N_γ については $NB=48$ を採用することとした。

(2) 支持力分布形状の影響

式(17)で述べたように、本法では支持力分布を図-5の形で取り入れられるようになっているが、実際の計算では粘着力とサーチャージ成分には等分布、自重成分には三角形分布の仮定がよく適合するようである¹¹⁾。しかし、成分ごとに分布形を変えて支持力（係数）を計算することは、支持力公式に基づく重ね合わせ計算では有効であるとしても、全ての成分を同時に含む支持力を直接的に求める場合などでは不都合である。加えて、三次元支持力における重ね合わせ計算の妥当性はほとんど検証されていない。この点は後に論じるとして、ここでは自重成分の支持力係数 $N_\gamma T$ について、三角形分布を仮定した場合（ $N_\gamma T$ ）と、他の成分と同様に等分布を仮定した場合（ $N_\gamma U$ ）の比較を行い、支持力値に与える分布形状の影響を調べてみた。図-8は摩擦角 ϕ' と基礎幅比 L/B を変えて $N_\gamma T$ と $N_\gamma U$ の差を比率として見たものである。図から知れるように、両者の差は通常よく用いられる ϕ' と L/B の値に対して高々3%程度と見なしてよい。また常に $N_\gamma T > N_\gamma U$ であるので、安全側の値をとる意味でも、他の成分と同様に等分布仮定を採用した方が実用的と考えられる。以上の点を踏まえ、本文では以下において支持力はすべて等分布と仮定して計算する。

(3) すべり面形状

さて、本法の三次元支持力解析で仮定した曲面すべり面の形状を、2つの代表例について図-9に示した。すなわち、(a)は $\phi = 0$ の粘土地盤の N_c 、(b)は $\phi' = 30^\circ$ の砂地盤の N_γ を与える最危険すべり面であり、両者とも $L/B=2$ の場合についてすべり領域の半分を俯瞰する形で描いている。(a)の

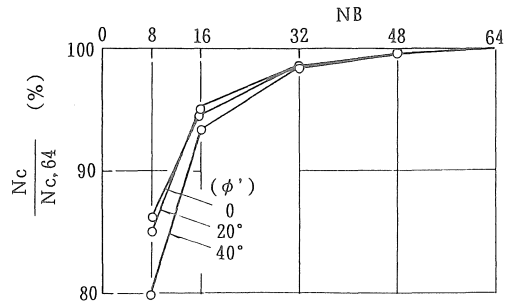


図-7 分割数の影響

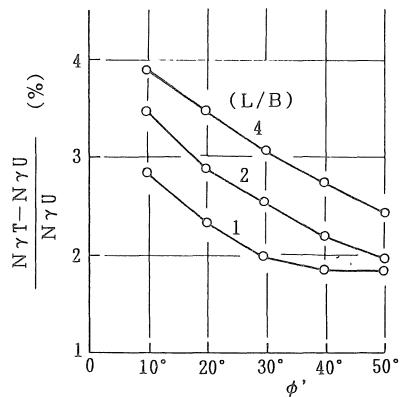


図-8 支持力分布の影響

場合は $\phi = 0$ であるから、すべり面は円弧の組み合わせで構成され、(b)の場合は基礎左端から始まる $\phi' = 30^\circ$ の対数らせん線と対数らせん線とで構成される。この場合、本法の解析では対数らせん線の極 $O(r_0, \alpha)$ の傾角 α は一定であるから、半径あるいは始線長 r_0 だけが基礎の長手方向に変化することになる。なお、土柱分割の様子を明瞭に示すために、図では分割数を $NB=24$ としてすべり面を網目状に描いているが、実際の計算では分割を更に2倍以上細かくして数値解を求めている。

図-10は基礎幅比 L/B の変化に伴うすべり領域の拡大・縮小傾向を調べるために、 $x=0$ の $y-z$ 面内に描かれるすべり面の最大断面を比較したものである。(a)は $\phi' = 0, 30^\circ$ の N_c を与える最大断面、(b)は $\phi' = 30^\circ$ の N_q および N_γ を与える最大断面であり、 $L/B=1, 2, 4, 8$ について比較している。また参考のため、筆者ら¹⁹⁾が先に提案した対数らせん線解析によるすべり面を二次元解として破線で示した。図から次のようなことが知れる。

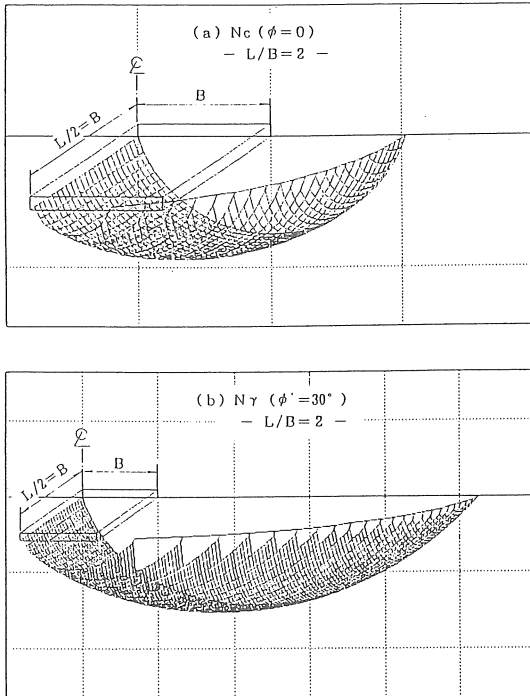


図-9 曲面すべり面

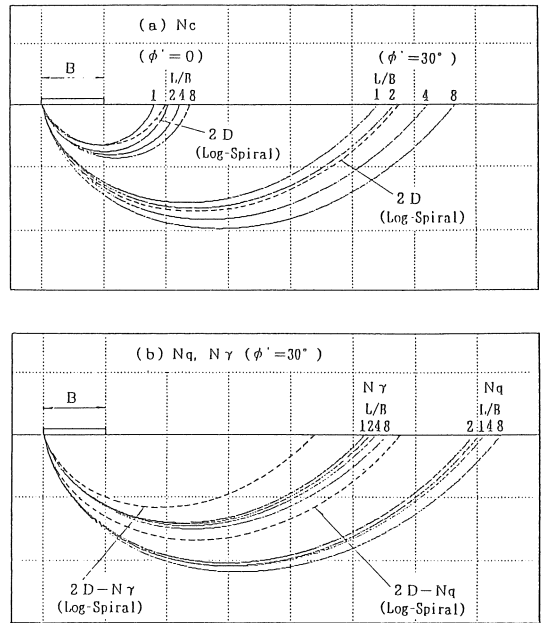


図-10 すべり領域の比較

① L/B の増加に伴ってどの場合でもすべり面は拡大する傾向にあるが、 N_q, N_γ ではその変化が極めて小さい。

② N_c では三次元と二次元ですべり面に大差はないが、 N_q, N_γ では三次元の方が明瞭に大きくなり、その差は2割程度である。

③ 同じ $\phi' = 30^\circ$ で比較すると、二次元解では N_q と N_c を与えるすべり面が一致するが、三次元解では N_q, N_c, N_γ の順にすべり面が大きくなる。

3. 2 支持力係数

(1) 支持力係数表

表-1(a)~(c)は3つの支持力係数(N_c, N_q, N_γ)について摩擦角 ϕ' と基礎幅比 L/B の影響を調べたものである。各表の右端の2欄は帯基礎に対する二次元解であり、 LS は筆者ら¹⁹⁾の対数ら線解、 CK はCaquot-Kerisel解¹⁾である。Vesic¹⁾によれば、帯基礎の条件が満たされる基礎幅比の値は、厳密に言えば $L/B > 10$ であるが、実際には $L/B > 5$ としている。表から知れるように、本法の解も L/B 大なるに従って一定値に漸近する傾向が見られるが、その収束状況は支持力係数や ϕ' 値によってかなり異なるようである。共通して言えることは、

L/B の増加に伴って支持力係数の値が二次元 LS 解に近づくことである。これは、本法の三次元支持力解析が基本的には対数ら線の組み合わせで構成される曲面すべり面を扱っているためと考えられる。

(2) 対応定理

図-11は三次元の支持力係数(N_c, N_q)について対応定理

$$N_c = (N_q - 1) \cot \phi' \quad (25)$$

の精度を調べたものである。右辺で計算される値を N_c' とすると、 $ec = 2(N_c - N_c') / (N_c + N_c')$ より対応定理からの誤差が求められ、これを $L/B \sim \phi'$ 空間にプロットすると $ec(\%)$ の分布が描ける。図によると、対応定理が概略成立つと見てよい範囲($ec < 10\%$ 程度)は $L/B > 8$ であり、正方形基礎($L/B = 1$)に近づくほど誤差が加速的に増加することが分かる。これは、三次元の N_c 値が $L/B = 1$ に至るに従って急激に増加するのに対し、 N_q 値は逆にわずかながら減少する傾向にあるためである。また、二次元解では同じ ϕ' 値に対し N_c と N_q を与えるすべり面は一致するが、三次元解では図-10に示したように、両者ですべり面の大きさや L/B の変化に伴うすべり面の拡大傾向が異なり、これらの特性の相違が対応定理の成否に複雑に関連しているものと考えられる。

(3) 重ね合わせ性

三次元支持力についても式(24)の重ね合わせ計算が成り立つか否かを調べるために、 c' 、 p_0 および γB 値のいろいろな組み合わせに対し、支持力解析を行って直接最小化して求めた支持力値(qu_1)と、表-1の支持力係数を用いて重ね合わせ計算して求めた支持力値(qu_2)を比較してみた。この場合、 $p_0 = \gamma D$ (D : 根入れ深さ)として式(24)を正規

化すると

$$\frac{qu}{\gamma B} = \frac{c'}{\gamma B} Nc + \frac{D}{B} Nq + 0.5N\gamma \quad (26)$$

と表されるから、支持力に寄与する因子は $c'/\gamma B$ 、 D/B 、 ϕ' および L/B の4つである。図-12は $L/B=1, 4$ および $D/B=0, 1$ の場合について、支持力値の誤差 $es=2(qu_1 - qu_2)/(qu_1 + qu_2)$ と $c'/\gamma B$ の関係を ϕ' をパラメータとして描いた

表-1 支持力係数表

(a) Nc

ϕ	L/B				二次元解	
	1	2	4	8	L S	C K
0	5.874	5.282	5.207	5.376	5.52	5.14
5°	8.262	7.135	6.837	6.964	7.09	6.49
10°	12.131	9.990	9.259	9.251	9.31	8.35
15°	18.662	14.596	12.989	12.670	12.53	10.98
20°	30.341	22.432	19.052	17.977	17.39	14.83
25°	52.781	36.694	29.491	26.707	25.02	20.72
30°	98.715	64.463	48.718	42.127	37.60	30.14
35°	201.67	124.08	87.605	71.602	59.65	46.12
40°	459.03	266.50	175.33	134.22	101.3	75.31
45°	1190.0	657.85	403.19	286.49	187.9	133.9

(b) Nq

ϕ	L/B				二次元解	
	1	2	4	8	L S	C K
0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.00	1.00
5°	1.0	1.0	1.0	1.0	1.62	1.57
10°	1.837	1.974	2.148	2.346	2.64	2.47
15°	3.255	3.453	3.692	3.965	4.36	3.94
20°	5.853	6.137	6.458	6.826	7.33	6.40
25°	10.778	11.190	11.622	12.092	12.67	10.66
30°	20.439	21.123	21.724	22.187	22.71	18.40
35°	40.367	41.526	42.468	43.066	42.71	33.30
40°	84.305	86.776	88.642	89.606	86.01	64.20
45°	191.09	196.62	201.27	203.84	188.9	134.9

(c) $N\gamma$

ϕ	L/B				二次元解	
	1	2	4	8	L S	C K
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5°	0.181	0.270	0.349	0.401	0.38	0.45
10°	0.897	1.043	1.202	1.340	1.27	1.22
15°	2.521	2.778	3.078	3.378	3.19	2.65
20°	6.300	6.728	7.249	7.820	7.32	5.39
25°	15.361	16.005	16.868	17.881	16.52	10.88
30°	37.826	38.927	40.234	41.971	38.07	22.40
35°	97.944	99.837	101.55	103.89	92.48	48.03
40°	273.29	276.92	278.78	282.06	243.9	109.4
45°	853.42	862.98	864.74	863.75	724.4	271.8

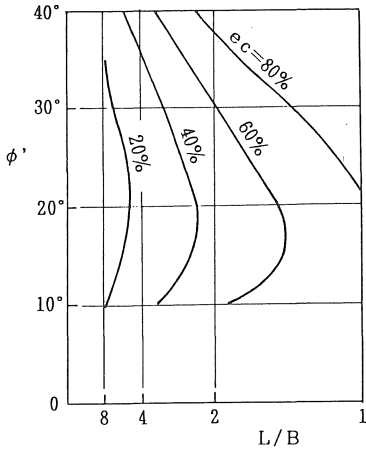


図-11 対応定理の精度

ものである。筆者ら²⁰⁾は先に、二次元の対数線解について同様な形で重ね合わせ誤差の検討を行ったが、その結果を含めて図-12から言えることをまとめると以下ようになる。

①D/B=0 の場合は、L/B が大きく、二次元に近づくほど誤差 es が増大する。また、 $c'/\gamma B < 0.5$ の範囲では粘着力項に比べて自重項が相対的に大きくなるので、 es 値は摩擦角 ϕ' によって大きく変動する。

②D/B=1 の場合は、 $c'/\gamma B$ の小さい範囲で $p_0 (= \gamma D)$ 項の影響が現れるので、 es 値は ϕ' に関係なくほぼ一定値を示し、最大で $es = (4 \pm 1)\%$ 程度とみてよい。この最大値は、二次元解を含めて、L/B にほとんど影響されない。

③二次元解では es が正で、重ね合わせ計算は常に安全側であったが、L/B=1~4 では es が負になる場合がある。ただし、その絶対値は高々 0.7% 程度であり、無視し得るほど小さいと考えてよい。

以上を総括すると、三次元効果が顕著に現れると考えられる L/B=1~4 の範囲では、D/B=0~1 (浅い基礎) に対して重ね合わせ誤差 es は最大で 5% 程度であり、支持力公式を用いた重ね合わせ計算の適用性が首肯される。

3. 2 形状係数

図-13 (a)~(c) の実線は表-1(a)~(c) の 3 つの支持力係数 (N_c , N_q , N_γ) について三次元解と二次元 L S 解との比をとり、基礎幅比 L/B

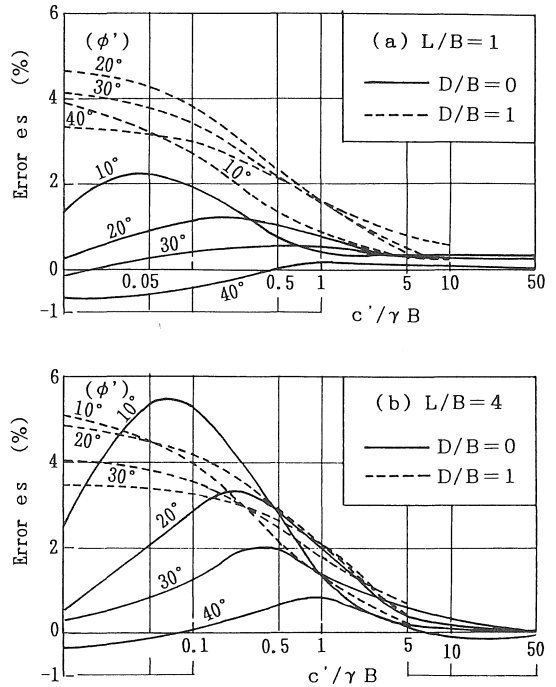


図-12 重ね合わせ性の検討

または B/L との関係調べたものである。三次元解と対比すべき二次元解に L S 解を用いたのは、特に図-13 (b), (c) の N_q , N_γ を見て分かるように、本法の三次元解が $L \rightarrow \infty$ に対して一定値に漸近する傾向が見られなかったことと、前節で述べたように本法で仮定した曲面すべり面が基本的には対数線すべり線構成されていることによる。縦軸にとった支持力係数 (二・三次元を添字 “2, 3” で表す) の比は、帯基礎の支持力公式: 式(24)を一般の三次元問題に適用するための補正係数、すなわち形状係数に相当し、支持力成分に対応して s_c , s_q , s_γ と記される¹⁾。以下、形状係数ごとに従来から提案されている実験式や経験的な実用式との比較を行うが、これらの式では形状係数と基礎幅比 B/L の関係を一次式

$$s = 1 + n \cdot (B/L) \tag{27}$$

の形で表すことが多いので、 s_c , s_q , s_γ に対応する比例係数をそれぞれ n_c , n_q , n_γ と置き、これらも形状係数と呼ぶことにする。

(1) 粘着力項: $s_c (n_c)$

図-13(a) に見られるように、全ての ϕ' において $B/L \rightarrow 0$ の極限で $s_c = 1$ となり、本法の N_{c3} は二次元 L S 解に滑らかに収束することが分かる。ま

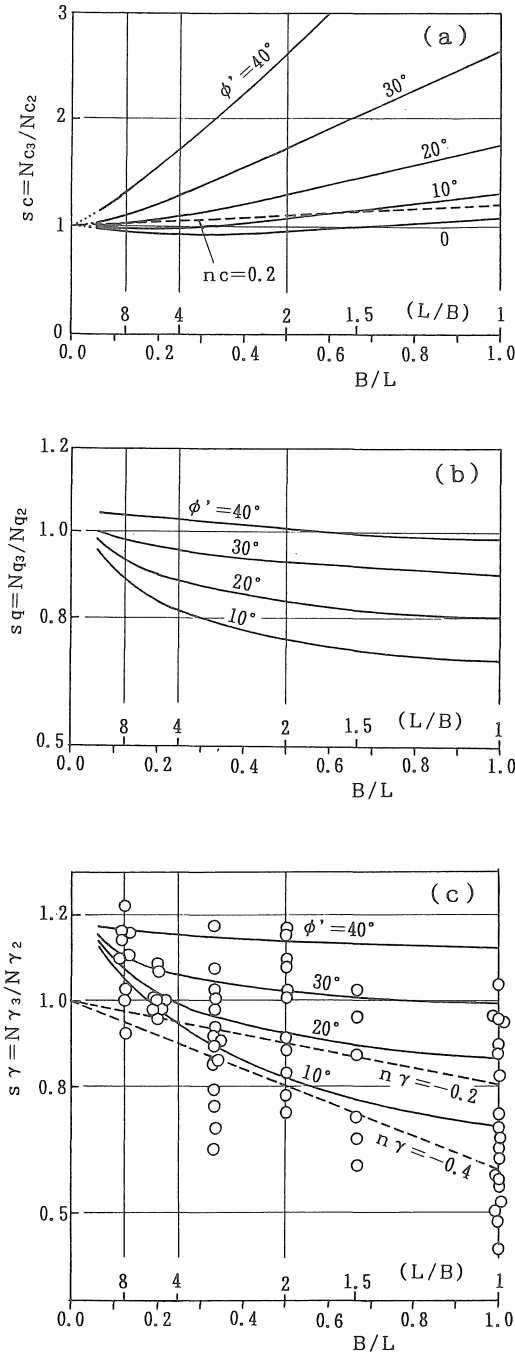


図-13 形状係数

た、 B/L の増加に伴う sc 値の増加は、 ϕ' 大なるほど直線的であり、かつその増加率が加速的に増す傾向がみられる。 $sc \sim B/L$ 関係については式(27)の形で幾つかの実用式が提案されており、比例係数

nc は摩擦角 ϕ' の関数として表示されることが多い。その代表的な式として

- ① $nc = Nq/Nc$: Vesic¹⁾
- ② $nc = 0.2 + \tan^6 \phi'$: B.Hansen²⁾
- ③ $nc = 0.2N\phi$: Meyerhof²²⁾

が挙げられる。ここで、①の Nq 、 Nc には二次元のCK解を用い、③では $N\phi = \tan^2(\pi/4 + \phi'/2)$ とする。図-13(a)には $nc=0.2$ とした場合の関係を破線で示した。図-14は $nc \sim \phi'$ 関係について以上の3式と本法の解を比較したものである。ただし、本法の解では $B/L=1$ (正方形基礎)の Nc_3 を二次元LS解で直接除した値を nc としている。このため、図-13(a)に見られるように、 ϕ' が小さい場合は実際の sc 値の増加率より小さい nc 値が得られている。いずれにしても本法の nc 値が実用式に対応するのはせいぜい $\phi' < 15^\circ$ の範囲であるが、粘土地盤の支持力では $\phi=0$ 法を含めて ϕ' の小さい範囲を扱うことが多く、逆に ϕ' の大きい砂地盤では Nc の効果が極めて小さいので、実際問題としては上記の範囲で議論しておけば十分と考えられる。

(2) 表面荷重項: sq (nq)

図-13(b)に見られるように、本法の解では sq が B/L の増加に伴って単調に減少し、 $sq \sim B/L$ 関係を式(27)と同様に直線関係と仮定した場合の比例係数は、 $B/L=1$ の Nq_3 と二次元LS解との比率で調べると $nc = -0.3 \sim 0$ の範囲にある。しかし、有限円筒形のすべり面を想定して議論を進めると、端部側面に作用する摩擦力が支持力増加につながるため常に $Nq_3 > Nq_2$ であり、その寄与率 sq は B/L の増加とともに増加して $nq > 0$ になる¹⁸⁾。つり合い計算によって概略の値を求めると下の①を得るが、同様の特性はDe Beer²³⁾の実験でも見られており、砂地盤に対する多数の載荷試験の結果から②を導い

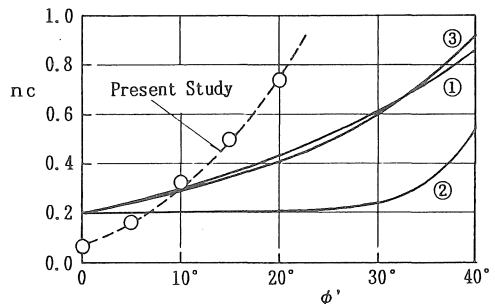


図-14 $nc \sim \phi'$ 関係

ている。

$$\begin{aligned} \textcircled{1} \quad n\gamma &= (1/3)\tan\phi' \\ \textcircled{2} \quad n\gamma &= \tan\phi' \end{aligned} \quad (29)$$

このように、本解析では $s\gamma$ ($n\gamma$) の性質において従来とは相反する特性が見られているが、その主な理由として、本法では有限円筒とは極めて異なる紡錘形のすべり面を仮定していることと、側方拘束力の意味を持つ xz 面内の不静定内力 ΔP_{xz} をすべり面に平行に働くと仮定したことなどが挙げられる。すなわち、図-9(b)に示したような曲面すべり面では、すべり土塊に対する周囲からの拘束性が小さく、有限円筒で想定するような端部摩擦力の効果はあまり期待できない。また、すべりと直交する xz 面内のすべり面形状や不静定内力の作用状況を L/B の大小に応じて模式的に描くと図-15のようになり、 L/B 大なるほど不静定内力の作用方向が水平で側方からの水平土圧 $\sigma'h$ の伝達を受ける部分が多くなるため、拘束効果が高まって支持力が大きくなるものと考えられる。

(3) 自重項: $s\gamma$ ($n\gamma$)

上記の $s\gamma$ の特性は摩擦角に関連するものであるから、自重項の支持力でも同様な傾向としてみられ、図-13(c)のように $s\gamma$ は B/L の増加とともに減少する。また本法の $N\gamma_3$ は B/L を小さくしても二次元 LS 解に漸近することではなく、 $s\gamma$ は $B/L \rightarrow 0$ で大体 1.2程度に収束する傾向がみられる。このように $B/L \rightarrow 0$ で $s\gamma \rightarrow 1$ にならないと $s\gamma$ の形状係数としての意味が損なわれるのであるが、この点は $N\gamma_3$ と対比すべき二次元解の採り方にもよるので、今後とも検討を要する問題と考えられる。なお、 B/L の増加に伴う $s\gamma$ の減少の仕方だけに着目すると、 $\phi' = 10^\circ$ において $B/L \rightarrow 1$ で $s\gamma \approx 0.7$ 、 $B/L \rightarrow 0$ で $s\gamma \approx 1.2$ であるから、2点を結ぶ直線の比例係数として $n\gamma \approx -0.5$ が得られる。

$s\gamma$ についても式(27)の形で幾つかの実用式が提案されており、係数 $n\gamma$ の代表例として

$$\begin{aligned} \textcircled{1} \quad n\gamma &= -0.4 \quad : \text{De Beer}^{23)} \\ \textcircled{2} \quad n\gamma &= -0.5(0.2 + \tan^6\phi') \quad : \text{B. Hansen}^{21)} \\ \textcircled{3} \quad n\gamma &= 0.1N\phi \quad (\phi' > 10^\circ) \quad : \text{Meyerhof}^{22)} \end{aligned} \quad (30)$$

などが挙げられる。①は砂地盤に対する多数の支持力試験から得られたものである。②は式(28)の②と形状係数の性質を利用して導いた式であり、 $\phi' = 0 \sim 40^\circ$ に対して $n\gamma = -0.1 \sim -0.28$ となる。図-13(c)には参考のため $n\gamma = -0.2$ と -0.4 の直線を破線で示すと同時に、各方面で行われた支持力

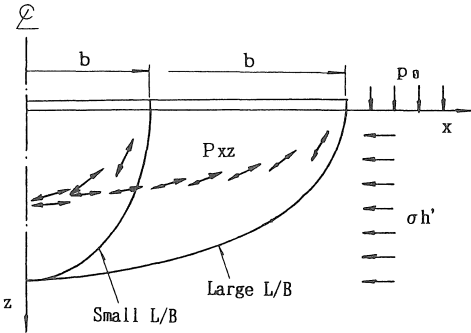


図-15 不静定内力の作用状況

試験の結果を○印でプロットした。これらは実線で描いた本法の解と定性的には比較的良好に対応しているように思われる。

ところで、上式③で Meyerhof²²⁾ は $n\gamma > 0$ ($s\gamma > 1$) なる式を提案しているが、実験的には $\phi' > 30^\circ$ で円形や正方形基礎の $N\gamma$ が帯基礎の $N\gamma$ を下回り、 $s\gamma < 1$ となって理論と矛盾する点があるとも述べている。そして、この主な理由として応力状態の相違に伴う中間主応力の影響を取り上げ、矩形基礎においては摩擦角 $\phi'r$ を B/L の値に応じて三軸圧縮 ($\phi't$) と平面ひずみ圧縮 ($\phi'p \approx 1.1\phi't$) の間で内挿して定めるべきとし

$$\phi'r = (1.1 - 0.1B/L)\phi't \quad (31)$$

なる式を提案している。このような応力状態の相違が $N\gamma$ に与える影響をもう少し詳しく調べるために、 $B \times L$ の基礎の両端の ($B \times B/2$) 部分と中間の ($L - B$) 部分で応力状態が異なるとした場合の解析を行ってみた(図-16)。すなわち、真中の ($L - B$) 部分では平面ひずみ状態を考慮して $\phi'p$ を用い、両端の ($B \times B/2$) 部分では端部で三軸、内側で平面ひずみ状態と考慮して平均的な値 $\phi'm = (\phi't + \phi'p)/2$ を用いて摩擦成分を計算した。ただし、 $\phi'p = 1.1\phi't$ (したがって $\phi'm = 1.05\phi't$) とし、すべり面の形状は $\phi'p$ と $\phi'm$ の重み付き平均値

$$\phi's = (\phi'p(L - B) + \phi'mB)/L$$

を用いて定めた。図-16の○印のプロットは $\phi't = 30^\circ$ の場合の計算結果であり、 $N\gamma \sim B/L$ 関係は破線のようにほぼ直線で近似される。参考のために $\phi'p = 33^\circ$ 、 $\phi'm = 31.5^\circ$ それぞれ一定の場合の解を実線で描いたが、プロット点は B/L の増加に伴って $\phi'p$ 線から $\phi'm$ 線へ単調に移行する様子が見られる。破線の間隔を $B/L \rightarrow 0$ に延長して求めた $N\gamma$ を帯基礎の解と見なして形状係数の変化を調べると、

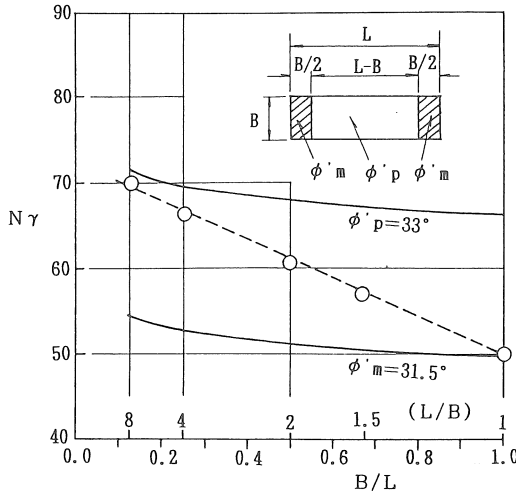


図-16 $N\gamma$ に与える応力状態の影響

直線式の比例係数として $n\gamma \approx -0.31$ を得る。同様の計算を $\phi't = 20^\circ, 40^\circ$ について行った結果はそれぞれ $n\gamma \approx -0.29, -0.35$ であり、応力状態の影響を考慮すると $\phi't$ にあまり関係なく $n\gamma \approx -0.3 \sim -0.35$ と考えてよいようである。

3. 3 正規圧密粘土地盤の支持力

$\phi = 0$ の均質粘土地盤においては、表-1(a)および図-13(a)に見られる通り、三次元の支持力値は二次元解と大幅な相違はなく、形状係数 s_c は基礎幅比 B/L にあまり関係なく $s_c \approx 1 \pm 0.06$ の範囲にあると考えてよい。以下では、非排水強さ c_u が深さ z とともに直線的に増加し

$$c_u = c_0 + k \cdot z \quad (32)$$

で表される正規圧密粘土地盤について検討した結果を述べる。 $\phi = 0$ であるから、本法の計算では円弧すべり線を長手方向に半径を変化させながら組み合わせた曲面すべり面を対象としている。

この種の地盤については、正方形及び長方形基礎に対し、中瀬⁴⁾の円筒形状のすべり面を仮定した安定解析や、鶴飼⁵⁾の基礎底面の粗滑を考慮した極限解析などが既に行われている。いずれの場合も二次元解(N_{c2})と三次元解(N_{c3})を

$$s_c = N_{c3}/N_{c2} = 1 + n_c(B/L) \quad (33)$$

の形で対比することによって形状係数 s_c (あるいは n_c) が定義されるが、式(32)の強度特性を有する地盤では、 n_c を無次元の指標 kB/c_0 と関連づけて整理すると便利である⁴⁾。図-17は $n_c \sim kB/c_0$

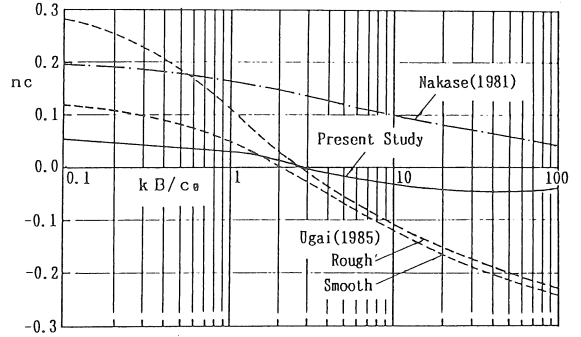


図-17 $n_c \sim kB/c_0$ 関係

関係を片対数で描いたものであり、中瀬の解を一点鎖線で、鶴飼の解を基礎底面の粗滑別に2つの破線で示している。図中の実線は本法の解であり、種々の kB/c_0 値に対して $B/L = 1$ (正方形基礎) として計算した支持力係数を N_{c3} 、二次元の円弧すべり計算による支持力係数(中瀬⁴⁾の表-1, $B/L = 0$ の場合)を N_{c2} として式(33)より n_c を求めている。図を見て分かるように、中瀬の解では n_c が常に正であるのに対し、本法の解と鶴飼の解では kB/c_0 が大なる範囲で n_c が負値を示す。加えて、後2者の n_c 値は絶対値的にかなり差があるが、 kB/c_0 値に対する変動傾向は、例えば $kB/c_0 = 2 \sim 3$ で $n_c \approx 0$ など、類似していると言える。

ところで、図-13(a)の $\phi' = 0$ の場合に見られるように、本法の三次元解では形状係数 s_c が基礎幅比 B/L に対して一定の割合で変動しないので、式(33)の直線関係は厳密には成立しない。この変動傾向をもう少し詳しく調べるために、図-18に代表的な $kB/c_0 = 0.1, 1, 10, 40$ の場合について $s_c \sim B/L$ 関係を描いてみた。この図で $B/L = 1$ における縦軸の s_c 値と $s_c = 1$ の差が、図-17にプロットした n_c である。図に示されているように s_c 値の

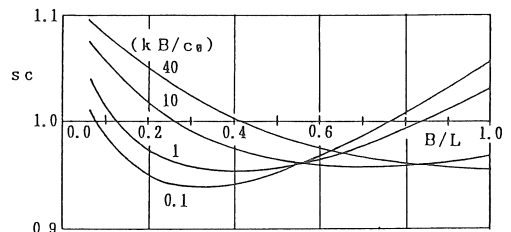


図-18 $s_c \sim B/L$ 関係

変動はかなり複雑であり、 B/L による増加あるいは減少の特性が $k B/c_0$ 値だけでなく B/L 自体にも影響されることが知れる。ただし、 B/L の小さい範囲 ($B/L < 1/4$) を除いて大まかな傾向として考えると、図-17で $nc \approx 0$ となる $k B/c_0 = 2 \sim 3$ を境として、 $k B/c_0$ の小さい範囲では s_c が増加傾向にあり、 $k B/c_0$ の大きい範囲では減少傾向にあると言える。この場合、 s_c 値の実際の変動量は、 $B/L = 1$ の s_c 値から割り出される 図-17の nc 値よりかなり大きくなると考えるべきであろう。例えば、 $k B/c_0 = 0.1$ の場合は、 $B/L = 0.25 \sim 1$ の範囲のほぼ直線的な部分の勾配として nc 値を概算すると $nc = 0.15 \sim 0.2$ となる。また、 $k B/c_0 = 40$ の場合は、 $B/L = 0 \sim 1$ の全範囲をやはり平均的な直線関係として見ると $nc \approx -0.15$ 程度が得られる。これらの値は図-17の従来解と大体対応していることが分かる。

4. まとめ

本研究で得られた知見をまとめて整理すると以下のようなになる。

(1) 本法の三次元支持力解析では土柱分割数の多少が解の精度に大きく影響し、収束解を得るためには短辺 B を 50~60 等分する程度の分割数が必要となる。また、支持力分布の相違が自重項の支持力値に与える影響は小さく、実用的には全ての場合について等分布仮定の計算で十分な精度が得られる。

(2) 三次元の曲面すべり面は基礎幅比 L/B の増加に伴って拡大する傾向にある。また、 N_q, N_γ を与えるすべり面は二次元解に比べて三次元解の方が 2 割程度大きい。そして、同一の ϕ' 値に対し三次元解のすべり面は N_q, N_c, N_γ の順に大きくなる。

(3) 本法の三次元支持力は $B/L \rightarrow 0$ に従って二次元対数線解に漸近する傾向が見られるが、その収束状況は支持力係数や ϕ' 値によってかなり異なる。

(4) 三次元解では対応定理: $N_c = (N_q - 1) \cot \phi'$ が成立し難く、正方形基礎 ($L/B = 1$) に近づくと誤差が加速的に増加する。これは、(2)で述べたすべり面の大きさや L/B の変化に伴うすべり面の拡大傾向が、 N_c と N_q でかなり異なることに起因していると考えられる。

(5) 三次元支持力においても支持力公式を用いた

重ね合わせ計算の妥当性が確かめられた。すなわち、三次元効果が顕著に現れると思われる $L/B = 1 \sim 4$ の範囲の浅い基礎 ($D/B < 1$) に対して、重ね合わせ計算による支持力は常に安全側であり、直接計算した支持力との誤差は最大で 5% 程度である。

(6) 粘着力に関する形状係数 s_c については、 ϕ' 大なるに従って本法の解が従来提案されている実用式を大きく上回る傾向にある。本法の解を実用式と対比して議論できる範囲は $\phi' < 15^\circ$ と考えられる。

(7) 本法の三次元解では表面荷重に関する形状係数 s_q が B/L の増加に伴って単調に減少し、従来の実用式とは相反する特性がみられた。これには紡錘形の曲面すべり面を仮定したことや、側方拘束に関する不静定内力をすべり面に平行に働くと仮定したことなどが複雑に関連していると考えられる。

(8) 自重項の形状係数 s_γ については、実用式あるいは支持力試験の結果と定性的によく対応する結果が得られた。また、基礎の両端と中央で応力状態が異なるとして三軸圧縮と平面ひずみ圧縮の摩擦角を使い分けて計算した結果では、 $s_\gamma \sim B/L$ 関係がほぼ直線で近似され、その比例係数は ϕ' にあまり関係なく $n_\gamma = -0.3 \sim -0.35$ となり、実用式で提案されている値とかなり近い値が示された。

(9) 非排水強さが深さとともに直線的に増加する正規圧密粘土地盤に対する解析では、 $k B/c_0 = 2 \sim 3$ を超えると形状係数 nc が負値になるなど、三次元の極限解析に基づく鵜飼の理論解と定性的に良く一致する結果を得た。

謝辞：本研究を進めるに当たり、広島大学工学部の日下部治助教授には貴重な資料の提供を頂いた。ここに謝意を表す。

(受理 平成 3 年 3 月 20 日)